

ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 630.43

DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2019-1(37-44)

Е.А. КУКАВСКАЯ*, **Л.В. БУРЯК****, **О.П. КАЛЕНСКАЯ*****, **А.В. ТОЛМАЧЁВ******,
С.В. ЖИЛА*, **А.Е. БАРАБАНЦОВА******

*Институт леса им. В.Н. Сукачёва СО РАН, обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН,
 660036, Красноярск, ул. Академгородок, 50, стр. 28, Россия,
kukavskaya@ksc.krasn.ru, new_science@bk.ru

**«Центр лесной пирологии», филиал Всероссийского научно-исследовательского института
 лесоводства и механизации лесного хозяйства,
 660062, Красноярск, ул. Крупской, 42, Россия, lburak@mail.ru

***Сибирский государственный университет науки и технологий им. акад. М.Ф. Решетнёва, 660049,
 Красноярск, пр. Мира, 82, Россия, 66forest@mail.ru

****Национальный парк «Шушенский бор», 662710, Красноярский край,
 пос. Шушенское, ул. Луговая, 9, Россия, tolmachev2080@mail.ru, anna-gav.103@mail.ru

**ОЦЕНКА ПИРОГЕННОЙ ЭМИССИИ УГЛЕРОДА
 НА ТЕРРИТОРИИ НАЦИОНАЛЬНОГО ПАРКА «ШУШЕНСКИЙ БОР»**

Разработана карта запасов органического вещества на поверхности почвы для территории Перовского участкового лесничества национального парка «Шушенский бор» на основе собственных наземных данных по запасам горючих материалов и данных лесоустройства по распределению лесных земель по различным категориям и типам леса. Составлены карты потенциальной эмиссии углерода при различных сценариях развития низовых пожаров в зависимости от их интенсивности. Установлено, что при пожарах от низкой до средней интенсивности потенциальный выход углерода на территории всего лесничества оценивается в 70,6 тыс. т, а при высокоинтенсивных пожарах — 142,9 тыс. т. Выявлен значительный вклад пирогенной эмиссии на торфяных почвах. На основе официальных данных по горимости за период с 1991 по 2016 г. и с использованием разработанных карт рассчитана фактическая эмиссия углерода при пожарах на территории равнинной части национального парка, которая составила 3,2 тыс. т. Определено, что на долю живого напочвенного покрова приходился 21 % общей эмиссии углерода, опада и подстилки — 79 %. Приведено распределение пирогенной эмиссии углерода по месяцам пожароопасного сезона. Установлено, что фактическая ежегодная эмиссия углерода за исследуемый период составила в среднем 121 т, при этом 92 % приходилось на весенний период, характеризующийся большей площадью, пройденной огнем. Рекомендовано использование результатов исследования для прогнозирования характеристик и последствий пожаров, а также для оценки влияния пожаров на региональный бюджет углерода и качество окружающей среды.

Ключевые слова: запасы горючих материалов, низовые пожары, карты запасов и выхода углерода при пожарах.

Е.А. KUKAVSKAYA*, **L.V. BURYAK****, **O.P. KALENSKAYA*****, **A.V. TOLMACHEV******,
S.V. ZHILA*, **A.E. BARABANCOVA******

*V.N. Sukachev Institute of Forest, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
 separate subdivision of the FRC KSC SB RAS, 660036, Krasnoyarsk, ul. Akademgorodok, 50, str. 28,
 Russia, kukavskaya@ksc.krasn.ru, new_science@bk.ru

**Center of Forest Pyrology, Branch of the All-Russian Research Institute of Silviculture and
 Mechanization of Forestry, 660062, Krasnoyarsk, ul. Krupskoi, 42, Russia, lburak@mail.ru

***M.F. Reshetnev Siberian State University of Science and Technology,
 660049, Krasnoyarsk, pr. Mira, 82, Russia, 66forest@mail.ru

****Shushenskii Bor National Park, 662710, Krasnoyarsk krai,
 pos. Shushenskoe, ul. Lugovaya, 9, Russia, tolmachev2080@mail.ru, anna-gav.103@mail.ru

EVALUATION OF PYROGENIC CARBON EMISSIONS ON THE TERRITORY OF SHUSHENSKII BOR NATIONAL PARK

The map of reserves of organic matter on the soil surface was developed for the Perovskoe forestry of Shushenskii Bor National Park with a use of our ground-based data on fuel loads as well as forest inventory data on the distribution of forested lands by different categories and forest types. We compiled the maps of potential carbon emissions for different scenarios of surface fires depending on their severity. The potential carbon emissions from fires of low to moderate severity and of high severity on the territory of the entire forestry were estimated at 70.6 and 142.9 thousand tons, respectively. A significant contribution of pyrogenic emissions from peat soils was revealed. Based on official fire data from 1991 to 2016 and using the maps developed, we calculated the actual carbon emissions from fires on the study territory of National Park which amounted to 3.2 thousand tons. It was determined that the living ground cover accounted for 21 % of the total carbon emissions, with 79 % corresponding to litter and duff. The distribution of the fire carbon emissions by months of the fire season is provided. Actual annual carbon emissions due to fires averaged was 121 tons for the period studied, with 92 % emitted due to spring fires dominating the area. The results obtained could be used to forecast fire behavior and effects as well as to estimate fire impact on regional carbon budget and environmental quality.

Keywords: fuel loads, surface fires, maps of fuel loads and fire carbon emissions.

ВВЕДЕНИЕ

Пожары — один из основных факторов, дестабилизирующих лесные экосистемы и оказывающих существенное воздействие на структуру лесов, их биомассу и цикл углерода [1, 2]. Бореальные леса являются регионом стока углерода, однако воздействие пожаров может трансформировать лесные экосистемы в источники углерода за счет прямых его выбросов при сгорании биомассы, а также косвенных воздействий пожаров на тепловую и водный режим, структуру и функционирование экосистем [3]. В Сибири пожары растительности охватывают несколько миллионов гектаров [4, 5]. За последние десятилетия частота пожаров в бореальных лесах возросла, и эта тенденция в условиях продолжающегося глобального изменения климата будет сохраняться [6]. При горении органического вещества в атмосферу выделяются углеродсодержащие газы, усиливающие парниковый эффект. Повышение интенсивности горения и прогнозируемая трансформация низовых пожаров в верховые в лесных экосистемах России [7] приведут к еще большему росту эмиссии углерода. В настоящее время мировое сообщество проявляет все больший интерес к точным количественным оценкам эмиссии от лесных пожаров, о чем свидетельствует ряд международных и правительственных документов, в которых предусматривается мониторинг объема выбросов парниковых газов. Выход углерода при пожарах на территории России колеблется, по данным разных источников, в диапазоне от 5 до 500 Мт С/год. Вариация оценок определяется применением при расчетах различных методик, алгоритмов и баз данных [5]. Современные методы дистанционного мониторинга пожаров позволяют осуществлять регулярную оценку горимости территорий [8], а использование ГИС-технологий дает возможность на основе этих данных проводить автоматизированный расчет и строить карты пирогенной эмиссии углерода [9, 10]. Однако наиболее важным источником ошибок при анализе пожарных эмиссий в бореальных лесах остается неизученность запасов комплекса горючих материалов [5, 11]. Необходимы региональные оценки запасов органического вещества и пирогенной эмиссии углерода в зависимости от лесорастительных условий и с учетом антропогенного воздействия на природные экосистемы. Характеристики пирогенной эмиссии в бореальной зоне часто не учитывают площадь, пройденную огнем в торфяниках. В России площадь оторфованных земель составляет 369 млн га, а запасы биогенного углерода в торфе болот и заболоченных земель — 113,5 млрд т [12]. Если бы на заболоченных территориях пожары возникали с интервалом 200 лет при условии сгорания растительных горючих материалов всего на 10 %, то они ежегодно добавляли бы 59 Мт углерода к эмиссиям от природных пожаров в России [13].

Расположение ленточных боров национального парка «Шушенский бор» на юге Красноярского края в районе, характеризующемся значительной антропогенной нагрузкой и находящемся в непосредственной близости со степными участками, обуславливает высокую пожарную опасность. За последние десятилетия горимость насаждений национального парка «Шушенский бор» существенно возросла [14]. Для моделирования распространения и развития пожаров на указанной территории необходима разработка карт напочвенных горючих материалов. Кроме того, существует острая потребность в получении точных и объективных оценок пирогенных эмиссий углерода в связи со значительным вкладом пожаров в региональный баланс углерода и воздействием на химию атмосферы.

Цель данного исследования — оценка пирогенной эмиссии углерода на территории Перовского участкового лесничества национального парка «Шушенский бор».

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Работы проводились на территории Перовского участкового лесничества национального парка «Шушенский бор», которое расположено в границах Алтае-Саянской горной лесорастительной области Хакаско-Минусинской лесной провинции [15]. Территория лесничества занимает площадь 4383 га.

Климат — резко континентальный. Средняя температура января -21°C , июля 20°C . Годовое количество осадков составляет в среднем 300 мм, мощность снежного покрова достигает 150 мм. Относительная влажность воздуха колеблется от 42 до 57 %. В лесорастительном покрове преобладают средне- и высокобонитетные сосновые насаждения мелкотравной, разнотравной и зеленомошной групп типов леса (77,3 %). Сухие и переувлажненные типы леса (лишайниковая и травяно-болотная группы) представлены незначительно — 9,9 % площади покрытых лесом земель. На территории лесничества расположены экстразональные сосновые ленточные боры, сформированные на песчаных дюнах. Встречаются березовые, осиновые и тополевые насаждения разнотравных и травяно-болотных групп типов леса. Почвенный покров представлен дерново-слабоподзолистыми (31,2 % территории Перовского лесничества), а также серыми и темно-серыми лесными почвами (35,6 %). Для центральных и юго-восточных участков характерно наличие довольно крупных болот и сопутствующих им торфяных типов почв.

Пирогенная эмиссия углерода рассчитывалась на основе информации о запасах лесных горючих материалов. Так как на исследуемой территории преобладают низовые пожары различной интенсивности, учитывались только напочвенные горючие материалы. Путем анализа данных лесоустройства на территории лесничества выделялись различные категории земель лесного фонда (поляны, сенокосы, болота и т. д.) и разные типы леса (сосняк разнотравный, сосняк зеленомошный, березняк травяно-болотный и т. д.). Всего было выявлено шесть категорий лесных земель и 21 тип леса, в пределах каждого из которых закладывали пробные площади для определения запасов напочвенных горючих материалов. На каждой пробной площади на 10–15 площадках размером $0,33 \times 0,33$ м отдельно собирали травы и кустарнички, опад, мох, лишайники и подстилку [16]. На торфянике запасы горючих материалов собирали послойно по двухсантиметровым слоям вплоть до минерального горизонта. Мощность торфяников варьировала от 0,3 до 1 м. Данная методика послойного взятия образцов увеличивает точность исследований и обработки материалов и позволяет, исходя из глубины прогорания, определить более точные величины сгоревшего запаса. Упавшие древесные горючие материалы отдельно не учитывали, так как в результате очистки насаждений сотрудниками национального парка валеж и ветки на территории Перовского лесничества практически отсутствуют, а мелкие ветви входили в состав опада. Образцы горючих материалов сушили в лабораторных условиях до абсолютно сухого состояния. На основе данных по запасам горючих материалов в разных типах лесов и на различных категориях лесных земель была построена карта запасов органического вещества на поверхности почвы, которая использовалась для определения потенциально возможных эмиссий углерода на территории Перовского лесничества. Принималось, что при низовых пожарах будут полностью сгорать травы и кустарнички, опад, мхи, лишайники, а также часть подстилки. Полнота сгорания подстилки при пожарах от низкой до средней интенсивности принималась равной 20 %, а при высокоинтенсивных пожарах — 80 % от запаса [17, 18]. При оценке пирогенной эмиссии углерода на торфяниках принято, что при пожарах от низкой до средней интенсивности сгорают травы и 10 см верхнего слоя органического вещества, а при высокоинтенсивных пожарах полнота сгорания верхнего горизонта достигает 30 см. Содержание углерода бралось равным 50 % от запаса органического вещества [19]. Для построения карт применялась программа ArcGIS, в которой объединение категорий участков и типов леса до 8–12 классов проводилось на основе фактических данных по запасам органического вещества и потенциальной пирогенной эмиссии углерода для их лучшей визуализации. Для расчета фактической эмиссии углерода при пожарах использовались данные национального парка о горимости территории Перовского участкового лесничества за период с 1991 по 2016 г.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенных исследований выявлено, что запасы напочвенных горючих материалов на лесопокрытой территории Перовского участкового лесничества национального парка «Шушенский

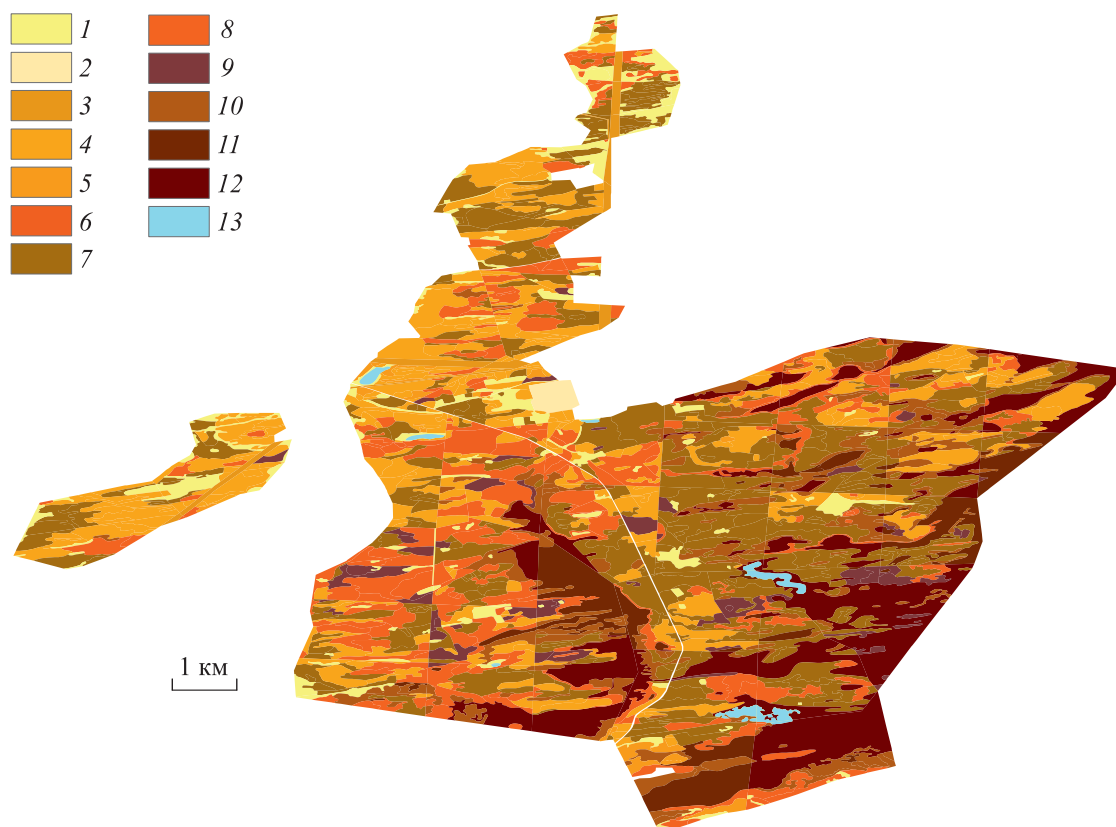


Рис. 1. Запасы органического вещества на поверхности почвы (т/га) на территории Перовского участкового лесничества национального парка «Шушенский бор».

Запасы: 1 — 0–5, 2 — 6–10, 3 — 11–15, 4 — 16–20, 5 — 21–25, 6 — 26–30, 7 — 31–35, 8 — 36–40, 9 — 41–50, 10 — 51–60, 11 — 61–600, 12 — >600. 13 — пруды, озера.

бор» варьируют от 18 до 56 т/га в зависимости от типа леса (рис. 1). На травы и кустарнички приходится от 1 до 11 % общего запаса органического вещества, опад — 15 %. Основной вклад (55–93 %) в общий запас горючих материалов вносит подстилка. На нелесных землях (поляны, сенокосы, ЛЭП и т. д.) запасы почвенных горючих материалов не превышают 12 т/га. Исключение составляют торфяники, где запасы органического вещества достигают 600 т/га и более.

На основе данных по запасам почвенных горючих материалов были разработаны карты потенциально возможной эмиссии углерода на территории Перовского участкового лесничества национального парка «Шушенский бор» в случае развития низовых пожаров от низкой до средней интенсивности, а также пожаров высокой интенсивности (рис. 2). При пожарах от низкой до средней интенсивности выход углерода на территории всего лесничества оценивается в 70,6 тыс. т, а при высокоинтенсивных пожарах — в 142,9 тыс. т. Наибольший вклад (до 65 % при развитии пожаров высокой интенсивности) в общую эмиссию углерода вносят пожары на торфяниках, которые занимают 18 % территории. Несмотря на то что высокое влагосодержание горючего материала на торфяниках препятствует распространению пожаров, при высоких классах пожарной опасности, складывающихся в условиях длительной засухи, возможно просыхание торфяного слоя и сгорание значительного запаса органического вещества. Так, в 2011 г. около пос. Шушенское на территории Саяно-Шушенского лесничества в течение нескольких месяцев горели осушенные торфяники, задымляя находящиеся вблизи населенные пункты и создавая угрозу перехода пожаров на лесные земли. При обследовании данных участков мы определили, что глубина прогорания торфяного горизонта составила 0,3–0,7 м, причем она могла быть значительно больше, если бы пожар не был ликвидирован. На землях национального парка средняя площадь одного пожара за период с 1991 по 2016 г. составила 8 га, что свидетельствует о высоком уровне организации охраны лесов на изучаемой территории. По данным наших исследований, глубина прогорания торфяного горизонта на изучаемой территории не превышала 30 см.

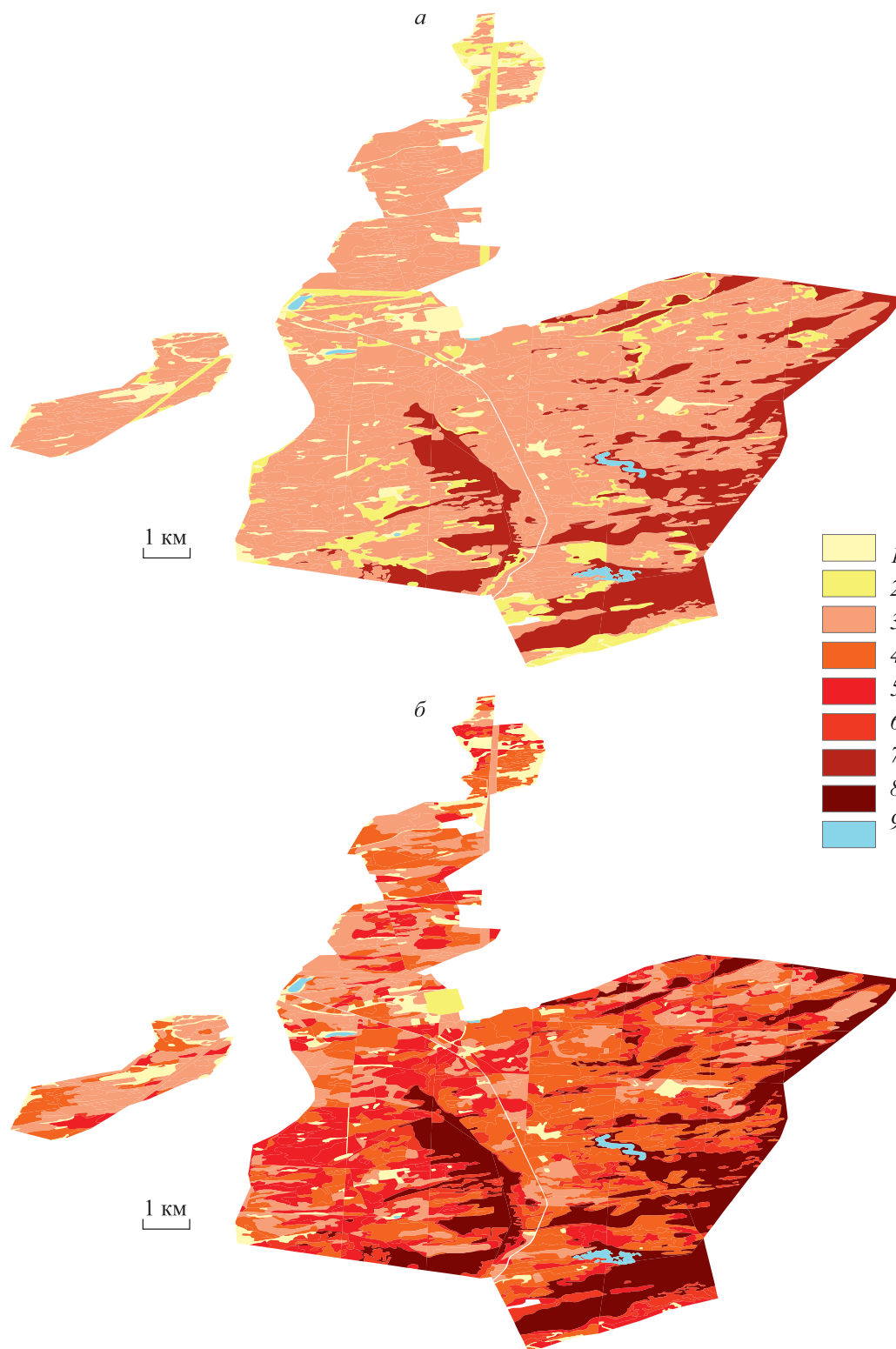


Рис. 2. Потенциальная эмиссия углерода (т/га) на территории Перовского участкового лесничества национального парка «Шушенский бор» при сценарии развития низовых пожаров от низкой до средней интенсивности (а) и высокой интенсивности (б).

Эмиссия: 1 – 0–2,5; 2 – 2,6–5; 3 – 5,1–10; 4 – 10,1–15; 5 – 15,1–20; 6 – 20,1–25; 7 – 25,1–65; 8 – 65,1–250. 9 – пруды, озера.

Фактический выход углерода при пожарах на территории Перовского участкового лесничества за 1991–2016 гг. составил 3,2 тыс. т (рис. 3, а). Пожары распространялись, как правило, низовые низкой и средней интенсивности, при которых сгорает верхний слой горючих материалов без существенного заглубления огня в подстилку. На долю живого напочвенного покрова приходился 21 % общей эмиссии углерода, опада и подстилки — 79 % (при вариации от 30 до 98 % в зависимости от типа леса и категории земель лесного фонда, пройденных огнем). Пики горимости, а следовательно, и выхода углерода наблюдались в 1998–1999, 2005 и 2007–2009 гг., что связано с погодными условиями этих лет. Например, в 1999 г. показатель влажности ПВ-1 уже 2 мая составил 5301 ед., что характеризует пожарную опасность по погодным условиям как высокую. В 2005 г. показатель ПВ-1 также превышал 4 тыс. ед., при этом максимум пожарной опасности пришелся на июль. В 1991–1995, 1997, 2000, 2003–2004, 2013 и 2015–2016 гг. пожары на территории лесничества не регистрировались. В среднем ежегодная эмиссия углерода за 1991–2016 гг. составила 121 т, при этом на семь лет с высокой горимостью (1998–1999, 2005, 2007–2009, 2012) приходится 94 % (3 тыс. т С) всего количества выделившегося за 26-летний период пирогенного углерода. В пересчете на площадь, пройденную огнем за 1991–2016 гг., выход углерода равен в среднем 9,9 т/га при доминировании низовых пожаров от низкой до средней интенсивности, что превышает эмиссию углерода в аналогичных насаждениях Нижнего Приангарья и Забайкалья [18, 20]. Это связано с высокой продуктивностью изучаемых насаждений и накоплением больших запасов напочвенных горючих материалов (мощность которых в зеленомошных типах леса достигает 30–40 см, а запас — 50 т/га). Разрастание мощного мохового покрова и накопление значительного запаса напочвенных горючих материалов произошло в том числе вследствие длительного межпожарного интервала, характерного для изучаемых насаждений. Это объясняется прежде всего эффективной организацией охраны лесов от пожаров на территории национального парка. Однако следует отметить, что нарастание запасов напочвенных горючих материалов в дальнейшем может привести к увеличению интенсивности пожаров и усугублению последствий их воздействия на лесные экосистемы парка.

Распределение эмиссии углерода по месяцам пожароопасного сезона на особо охраняемой природной территории показано на рис. 3, б. Максимальный выход углерода (55 %) отмечается в мае, ког-

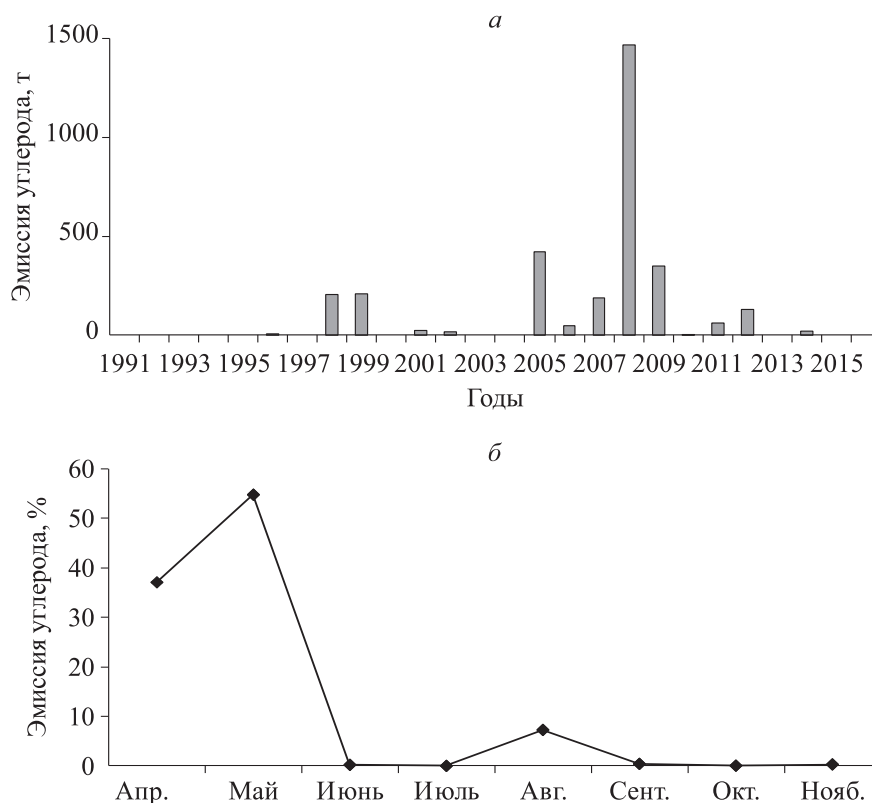


Рис. 3. Эмиссия углерода при пожарах растительности (а) и ее распределение по месяцам (б) на территории Перовского участкового лесничества (по данным за 1991–2016 гг.).

да на участки, пройденные огнем, приходится 60 % всей площади пожаров за 1991–2016 гг. Возникновение пожаров в весенний период и распространение их на значительные площади обусловлено доминированием на территории лесничества участков различных категорий и типов леса с травяным напочвенным покровом. Пожарная опасность и, соответственно, вероятность возникновения пожаров на таких участках лесных земель снижаются по мере увеличения запаса вегетирующих трав. В летний период пожароопасного сезона пожары возникают, как правило, в сосновых насаждениях зеленомошной группы типов леса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны карты напочвенных горючих материалов и пирогенной эмиссии углерода в зависимости от интенсивности низовых пожаров, которые могут быть использованы для прогнозирования развития и последствий пожаров на территории Перовского участкового лесничества национального парка «Шушенский бор». Установлено, что эмиссия углерода при пожарах на территории лесничества за 1991–2016 гг. составила 3,2 тыс. т. В среднем выход углерода был равен 121 т в год, при этом 92 % эмиссии приходится на весенний период. Эффективная организация охраны лесов от пожаров на территории национального парка приводит к уменьшению пирогенной эмиссии в связи с сокращением количества возгораний, площади пожаров и времени горения. В то же время она обуславливает и значительный выход углерода при пожарах за счет накопления большого запаса горючих материалов вследствие длительного межпожарного интервала. При изменении климата ожидается увеличение горимости и пирогенной эмиссии углерода, что будет оказывать существенное влияние на региональный и глобальный бюджет углерода и качество окружающей среды. Корректные оценки эмиссии углерода необходимы для проектирования стратегий пожароуправления (в том числе на этапе планирования противопожарных мероприятий и определения очередности тушения пожаров для предотвращения большого выхода парниковых газов) и могут быть использованы для разработки моделей изменения климата.

Работа выполнена при поддержке гранта президента РФ (МК-4646.2015.5) и проекта «Теоретические основы сохранения экологического и ресурсного потенциала лесов Сибири в условиях возрастающего антропогенного пресса и климатических аномалий» (AAAA-A17-117101940014-9).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Фурьев В.В.** Роль пожаров в процессе лесообразования. — Новосибирск: Наука, 1996. — 252 с.
2. **Harden J.W., Trumbore S.E., Stocks B.J., Hirsch A., Gower S.T., O'Neill K.P., Kasischke E.S.** The role of fire in the boreal carbon budget // *Global Change Biology*. — 2000. — N 6. — P. 174–184.
3. **Schapphoff S., Reyer C.P.O., Schepaschenko D., Gerten D., Shvidenko A.** Tamm Review: Observed and projected climate change impacts on Russia's forests and its carbon balance // *Forest Ecology and Management*. — 2016. — Vol. 361. — P. 432–444.
4. **Sukhinin A.I., French N.H., Kasischke E.S., Hewson J.H., Soja A.J., Csiszar I.A., Hayer E.J., Loboda T., Conard S.G., Romasko V.I., Pavlichenko E.A., Miskiv S.I., Slinkina O.A.** AVHRR-based mapping of fires in Russia: New products for fire management and carbon cycle studies // *Remote Sensing of Environment*. — 2004. — Vol. 93. — P. 546–564.
5. **Kukavskaya E.A., Soja A.J., Petkov A.P., Ponomarev E.I., Ivanova G.A., Conard S.G.** Fire emissions estimates in Siberia: Evaluation of uncertainties in area burned, land cover, and fuel consumption // *Canadian Journ. of Forest Research*. — 2013. — Vol. 43, N 5. — P. 493–506.
6. **Flannigan M.D., Krawchuk M.A., Groot W.J. de, Wotton B.M., Gowman L.M.** Implications of changing climate for global wildland fire // *International Journ. of Wildland Fire*. — 2009. — N 18. — P. 483–507.
7. **Швиденко А.З., Шепашенко Д.Г.** Климатические изменения и лесные пожары в России // *Лесоведение*. — 2013. — № 5. — С. 50–61.
8. **Justice C.O., Giglio L., Roy D., Boschetti L., Csiszar I., Davies D., Korontzi S., Schroeder W., O'Neal K.** Global fire products from the MODIS instruments // *Remote Sensing and Digital Image Processing*. — 2011. — Vol. 11, N 5. — P. 661–679.
9. **Ершов Д.В., Ковганко К.А., Сочилова Е.Н.** ГИС-технология оценки пирогенных эмиссий углерода по данным Terra-Modis и государственного учета лесов // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. — 2009. — Вып. 6, т. 2. — С. 365–372.
10. **Shvidenko A., Schepaschenko D., Sukhinin A., McCallum I., Maksyutov S.** Carbon Emissions from Forest Fires in Boreal Eurasia between 1998–2010 // *The 5th International Wildland Fire Conference*. Sun City, South Africa 9–13 May 2011 [Электронный ресурс]. — <http://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/9789/1/XP-11-010.pdf> (дата обращения 15.09.2016).

11. **French N.H., Goovaerts F.P., Kasischke E.S.** Uncertainty in estimating carbon emissions from boreal forest fires // Journ. of Geophysical Research. — 2004. — Vol. 109 [Электронный ресурс]. — <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2003JD003635> (дата обращения 08.10.2016).
12. **Вомперский С.Э., Иванов А.И., Цыганова О.П., Валяева Н.А., Глухова Т.В., Дубинин А.И., Глухов А.И., Маркелова Л.Г.** Заболоченные органогенные почвы и болота России и запас углерода в их торфах // Почвоведение. — 1994. — № 12. — С. 17–25.
13. **Conard S.G., Sukhinin A.I., Stocks B.J., Cahoon D.R., Davidenko E.P., Ivanova G.A.** Determining effects of area burned and fire severity on carbon cycling and emissions in Siberia // Climatic Change. — 2002. — Vol. 55, N 1–2. — P. 197–211.
14. **Каленская О.П., Буряк Л.В., Толмачев А.В.** Влияние пожаров на состояние сосновых насаждений в равнинной части национального парка «Шушенский бор». — Красноярск: Изд-во Сиб. технолог. ун-та, 2010. — 132 с.
15. **Коротков И.А.** Лесорастительное районирование России и республик бывшего СССР // Углерод в экосистемах лесов и болот России. — Красноярск: Изд-во Ин-та леса СО РАН, 1994. — С. 29–47.
16. **Курбатский Н.П.** Исследование количества и свойств лесных горючих материалов // Вопросы лесной пирологии. — Красноярск: Изд-во Ин-та леса и древесины СО АН СССР, 1970. — С. 5–58.
17. **Кукавская Е.А., Иванова Г.А.** Воздействие лесных пожаров на биомассу сосновых насаждений Средней Сибири // Вестн. Краснояр. аграр. ун-та. — 2006. — Вып. 12. — С. 156–162.
18. **Ivanova G.A., Conard S.G., Kukavskaya E.A., McRae D.J.** Fire impact on carbon storage in light conifer forests of the Lower Angara region, Siberia // Environmental Research Letters. — 2011. — N 6 [Электронный ресурс]. — <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/6/4/045203> (дата обращения 15.10.2016).
19. **Levine J.S., Cofer W.R.** Boreal forest fire emissions and the chemistry of the atmosphere // Fire, climate change and carbon cycling in North American boreal forests. — New York: Springer, 2000. — P. 31–48.
20. **Kukavskaya E.A., Buryak L.V., Ivanova G.A., Conard S.G., Kalenskaya O.P., Zhila S.V., McRae D.J.** Influence of logging on the effects of wildfire in Siberia // Environmental Research Letters. — 2013. — N 8 [Электронный ресурс]. — <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/8/4/045034> (дата обращения 20.10.2016).

Поступила в редакцию 23 октября 2016 г.
